

学校编码: 10384  
学号: 20720110153493

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_  
UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

博 士 学 位 论 文

微波合成上转换发光与磁性纳米材料及其  
在生物检测中的应用

Microwave Synthesis of Upconversion Luminescence and  
Magnetic Nanomaterials and Their Application in  
Biosensing

王东

指导教师姓名: 任磊 教授  
专 业 名 称: 高分子化学与物理  
论文提交日期: 2014 年 09 月  
论文答辩时间: 2014 年 11 月  
学位授予日期: 2014 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_  
评 阅 人: \_\_\_\_\_

2014 年 11 月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为( )课题(组)的研究成果,获得( )课题(组)经费或实验室的资助,在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（        ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，  
于        年        月        日解密，解密后适用上述授权。

（        ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年        月

# 目录

摘要.....	I
Abstract.....	I
第一章 绪论 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 纳米生物学简述 .....	1
1.3 微波合成 .....	5
1.3.1 微波加热的作用原理.....	5
1.3.2 微波加热的特性.....	8
1.3.3 微波加热在纳米材料合成中的应用.....	10
1.4 稀土掺杂上转换发光材料 .....	11
1.4.1 上转换发光机理.....	13
1.4.2 上转换发光纳米晶在生物成像及检测应用中的优势.....	16
1.5 磁性纳米材料 .....	19
1.5.1 磁性纳米材料的磁学特性.....	19
1.5.2 磁性纳米材料作为磁共振成像造影剂的应用.....	21
1.5.3 磁性纳米材料应用于细胞分离.....	22
1.6 本论文主要思路及研究内容 .....	25
参考文献 .....	27
第二章 稀土上转换发光/顺磁性纳米晶 $\text{NaGdF}_4\text{:Yb,Er(Tm/Ho)}$ 的快速微波合成及性质研究 .....	36
2.1 引言 .....	36
2.2 实验部分 .....	38
2.2.1 试剂及仪器.....	38
2.2.2 微波合成 $\text{NaGdF}_4\text{:Yb,Er(Tm/Ho)}$ 纳米晶 .....	39
2.2.3 产物表征.....	40

<b>2.3 结果与讨论</b>	<b>41</b>
2.3.1 微波合成过程的实时监测	41
2.3.2 典型微波合成得到的 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 纳米晶的晶相和形貌	42
2.3.3 反应温度和时间对 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 晶相转变和形貌的影响	44
2.3.4 初始反应物浓度对 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 纳米晶形貌尺寸的调控	46
2.3.5 传统加热方法合成 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 纳米晶的对照实验研究	47
2.3.6 微波加热合成 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 纳米晶的生长机理	50
2.3.7 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er/Tm/Ho 纳米晶的上转换发光性能	52
2.3.8 NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er 纳米晶的磁性能	53
<b>2.4 本章小结</b>	<b>55</b>
<b>参考文献</b>	<b>56</b>
<b>第三章 快速微波合成单分散 MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M=Fe, Mn, Co, Ni)超顺磁性 纳米晶及其作为 MRI T<sub>2</sub> 造影剂性能研究</b>	<b>60</b>
3.1 前言	60
3.2 实验部分	62
3.2.1 试剂及仪器	62
3.2.2 单分散 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (M=Mn, Fe, Co, Ni)磁性纳米晶的快速微波合成	64
3.2.3 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 磁性纳米晶的水溶性改性	65
3.2.4 理化表征	65
<b>3.3 结果与讨论</b>	<b>66</b>
3.3.1 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的 XRD 物相分析	66
3.3.2 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶形貌及尺寸的 TEM 表征	67
3.3.3 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的 FT-IR 表征	68
3.3.4 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的晶体结构及磁性能分析	69
3.3.5 反应温度和时间对 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的影响	71
3.3.6 微波合成 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的形成机理	73
3.3.7 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的亲水性表面改性表征	74
3.3.8 MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 纳米晶的 MRI T <sub>2</sub> 造影性能表征	75
<b>3.4 本章小结</b>	<b>77</b>

参考文献 .....	78
<b>第四章 上转换发光纳米晶@多巴胺-黑色素复合系统用于生物巯基化合物的检测 .....</b>	<b>81</b>
4.1 引言 .....	81
4.2 实验部分 .....	82
4.2.1 试剂及仪器 .....	82
4.2.2 实验方法 .....	84
4.3 结果与讨论 .....	86
4.3.1 UCNPs 的亲水性表面改性的表征 .....	86
4.3.2 多巴胺的氧化自聚合 .....	87
4.3.3 GSH 对 UCNPs 上转换发光的抗猝灭作用 .....	92
4.3.4 UCNPs@多巴胺-黑色素复合系统对 GSH 的检测 .....	94
4.3.5 UCNPs@多巴胺-黑色素复合系统对生物巯基化合物的特异性检测 .....	95
4.4 本章小结 .....	97
参考文献 .....	99
<b>第五章 正/负电荷荧光纳米磁珠用于癌细胞表面电荷的考查研究 .....</b>	<b>103</b>
5.1 引言 .....	103
5.2 实验部分 .....	107
5.2.1 试剂及仪器 .....	107
5.2.2 癌细胞株(Hela, S180)的培养 .....	108
5.2.3 正/负电荷荧光纳米磁珠与癌细胞的共孵育及磁分离 .....	109
5.2.4 荧光显微镜观察正/负电荧光纳米磁珠与 Hela 细胞的吸附结合 .....	110
5.2.5 考查唾液酸酐酶预处理对癌细胞表面电荷的影响 .....	110
5.2.6 考查 3-溴丙酮酸预处理对癌细胞表面电荷的影响 .....	110
5.3 结果与讨论 .....	111
5.3.1 正/负电荷荧光纳米磁珠与不同种系癌细胞的吸附及磁分离 .....	111
5.3.2 不同共孵育时间对正/负电荷纳米磁珠与癌细胞吸附作用的影响 .....	113

5.3.3 不同磁分离时间对正/负电荷纳米磁珠与癌细胞磁分离效果的影响 .....	113
5.3.4 荧光显微镜考察正/负电荷荧光纳米磁珠对 HeLa 细胞的吸附能力 .....	114
5.3.5 表面唾液酸分子的去除对癌细胞表面电荷的影响.....	115
5.3.6 糖酵解抑制剂 3-溴丙酮酸对癌细胞表面电荷的影响 .....	117
<b>5.4 本章小结 .....</b>	<b>120</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>122</b>
<b>研究总结与展望 .....</b>	<b>128</b>
研究总结 .....	128
研究展望 .....	129
<b>附录：博士期间研究成果 .....</b>	<b>131</b>
<b>致谢.....</b>	<b>133</b>

## Table of Contents

<b>Abstract in Chinese .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract in English .....</b>	<b>I</b>
<b>Chapter 1 Introduction .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Preface .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Nano-biomedicine .....</b>	<b>1</b>
<b>1.3 Microwave synthesis .....</b>	<b>5</b>
1.3.1 Basic theory of microwave heating .....	5
1.3.2 Characteristics of microwave heating .....	8
1.3.3 The application of microwave heating in nanomaterials synthesis .....	10
<b>1.4 Rare earth doped upconversion luminescence materials .....</b>	<b>11</b>
1.4.1 Mechanism of upconversion luminescence .....	13
1.4.2 The advantages of upconversion luminescence nanomaterials in biological imaging and sensing applications .....	16
<b>1.5 Magnetic nanomaterials .....</b>	<b>19</b>
1.5.1 The magnetic properties of magnetic nanomaterials .....	19
1.5.2 The application of magnetic nanoparticles as contrast agents in magnetic resonance imaging .....	21
1.5.3 The application of magnetic nanoparticles in cells separation .....	22
<b>1.6 The objectives and contents of this dissertation .....</b>	<b>25</b>
<b>References .....</b>	<b>27</b>
<b>Chapter 2 Rapid microwave synthesis of upconversion luminescence/paramagnetic NaGdF<sub>4</sub>:Yb,Er(Tm/Ho) nanoparticles.</b>	<b>36</b>
<b>2.1 Introduction .....</b>	<b>36</b>
<b>2.2 Experimental section .....</b>	<b>38</b>
2.2.1 Reagents and equipments .....	38



2.2.2 Microwave synthesis of NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er(Tm/Ho) nanocrystals	39
2.2.3 Characterization	40
<b>2.3 Results and discussion</b>	<b>41</b>
2.3.1 Real-time monitoring of microwave synthesis reaction	41
2.3.2 Crystal phase and morphology of NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals	42
2.3.3 The effect of reaction temperature and time on the NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals	44
2.3.4 The effect of the initial concentration of reactants on the NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals	46
2.3.5 The synthesis of NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals by conventional heating method	48
2.3.6 The growth mechanism of the NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals in microwave synthesis reaction	50
2.3.7 Upconversion luminescence properties of NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er/Tm/Ho nanocrystals	52
2.3.8 The magnetic property of NaGdF <sub>4</sub> :Yb,Er nanocrystals	53
<b>2.4 Summary</b>	<b>55</b>
<b>References</b>	<b>56</b>
<b>Chapter 3 Microwave synthesis of monodisperse MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M=Fe, Mn, Co, Ni) superparamagnetic nanocrystals and the property study as Magnetic Resonance Imaging T<sub>2</sub> contrast agent</b>	<b>60</b>
3.1 Introduction	60
3.2 Experimental section	62
3.2.1 Reagents and equipments	62
3.2.2 Microwave synthesis of MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (M=Fe, Mn, Co, Ni) nanocrystals	64
3.2.3 Hydrophilic modification of MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> nanocrystals	65
3.2.4 Characterization	65
<b>3.3 Results and discussion</b>	<b>66</b>
3.3.1 XRD characterization of MFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> nanocrystals	67

3.3.2 Morphology and size characterization of $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals .....	68
3.3.3 FT-IR characterization of $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals .....	69
3.3.4 Crystal structure and magnetic properties of $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals ...	71
3.3.5 The effect of reaction temperature and time on $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals.	73
3.3.6 The growth mechanism of the $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals in microwave synthesis reaction .....	74
3.3.7 Hydrophilic property characterization .....	75
3.3.8 The study of the $\text{MFe}_2\text{O}_4$ nanocrystals as MRI $T_2$ contrast agent .....	77
<b>3.4 Summary .....</b>	<b>77</b>
<b>References .....</b>	<b>78</b>
 <b>Chapter 4 Bio-inspired anti-off sensing platform for biothiols detection based on upconversion fluorescent nanoparticles and dopamine-melanin hybrid system .....</b>	 <b>81</b>
4.1 Introduction .....	81
4.2 Experimental section .....	82
4.2.1 Reagents and equipments .....	78
4.2.2 Methods .....	80
4.3 Results and discussion .....	97
4.3.1 The Morphology and size of UCNPs .....	83
4.3.2 The hydrophilic property of UCNPs .....	85
4.3.3 The spontaneous oxidation polymerization of dopamine .....	87
4.3.4 The anti-quenching effect of GSH on the upconversion fluorescence of UCNPs .....	92
4.3.5 GSH detection using the UCNPs@dopamine-melanin hybrid system.	94
4.3.6 The specificity of the UCNPs-dopamine-melanin towards biothiols ...	95
4.4 Summary .....	99
References .....	99
 <b>Chapter 5 The surface charge investigation of cancer cells by using</b>	

<b>positively/negatively charged magnetic nanoparticles and magnetic separation .....</b>	<b>103</b>
<b>5.1 Introduction .....</b>	<b>103</b>
<b>5.2 Experimental section .....</b>	<b>107</b>
5.2.1 Reagents and equipments .....	107
5.2.2 Hela, S180 cells culture .....	108
5.2.3 Incubation of positively/negatively charged magnetic nanoparticles with cancer cells and magnetic separation .....	109
5.2.4 Fluorescence microscopy investigation .....	110
5.2.5 The incubation of cancer cells with neuraminidase .....	110
5.2.6 The incubation of cancer cells with 3-bromine pyruvate .....	110
<b>5.3 Results and discussion .....</b>	<b>111</b>
5.3.1 Charge-induced magnetic separation of Hela cells and S180 cells ..	111
5.3.2 The effect of incubation time on the efficiency of separation .....	113
5.3.3 The effect of separation time on the efficiency of separation.....	113
5.3.4 Fluorescence microscopy on the interaction of positively/negatively charged magnetic nanoparticles with cancer cells .....	114
5.3.5 The influence of neuraminidase on surface charge of cancer cells.....	115
5.3.6 The influence of 3-bromine pyruvate on surface charge of cancer cells .....	117
<b>5.4 Summary .....</b>	<b>120</b>
<b>References .....</b>	<b>122</b>
<b>Conclusions and outlook .....</b>	<b>128</b>
<b>Appendix: Research achievements during Ph.D. study .....</b>	<b>131</b>
<b>Acknowledgements .....</b>	<b>133</b>

## 摘要

本论文以稀土掺杂上转换发光纳米晶和尖晶石型铁氧体磁性纳米粒子这两类纳米材料为研究主体,力图从制备方法、结构与性能关系及其在生物医学检测等几方面都有所创新性的研究。主要内容概括如下:

第一章,综述了微波加热的原理及其在无机纳米材料可控合成中的优势与应用,上转换发光的基本原理、磁性纳米材料的磁学特性以及这两类材料在生物医学中的应用研究进展。

第二章,结合微波加热与“乙醇/水”溶剂体系,发展了一种快速、便捷的 $\text{NaGdF}_4:\text{Yb},\text{Er}/\text{Tm}/\text{Ho}$ 上转换发光/顺磁性纳米晶制备方法。通过对照实验,证实微波加热不仅非常显著地把传统热传导加热条件下所需的数小时保持时间缩短到5 min以内,而且产物的形貌和尺寸均一性也得到了明显的提高。在实验的基础上,提出一种微波增强晶体均相成核与快速生长机理来进行解释。

第三章,发展了一种微波合成法来制备 $\text{MFe}_2\text{O}_4$  ( $\text{M}=\text{Fe}, \text{Mn}, \text{Co}, \text{Ni}$ )铁氧体磁性纳米材料。整个制备过程仅需要5 min以下即可完成,该反应过程中不需要调节反应体系pH值、不需要惰性气体保护等特殊措施。所得到的产物直径在6 nm左右,表现出非常好的尺寸和形貌均一性,并表现出超顺磁性和具有比已报道的类似尺寸 $\text{MFe}_2\text{O}_4$ 更高的饱和磁化强度。对所得到的 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{NiFe}_2\text{O}_4$ 作为MRI  $T_2$ 造影剂的造影性能进行研究,其中 $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ 、 $\text{CoFe}_2\text{O}_4$ 表现出比相同尺寸的 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 明显更高的弛豫率,具有良好的MRI造影应用潜力。

第四章,借助于近红外光激发下上转换发光过程在生物样品中的无背景干扰特性,以及生物巯基化合物显著的还原性和其对多巴胺自聚合生成类黑色素这一自氧化过程的异常灵敏性抑制作用,发展了一种近红外光激发下的“上转换发光纳米晶@多巴胺-黑色素”杂化系统用于生物巯基检测方法。该方法表现出良好的选择性和灵敏性。该工作丰富了生物巯基的抗氧化性质及多巴胺氧化自聚合过程的研究,这一生物巯基检测方法还有望应用于真实生物样品中还原性生物巯基化合物含量的测定。

第五章,分别使用表面负电性的和正电性的纳米磁珠,针对癌细胞表面电荷

性质进行研究。通过实验，提出了一种针对细胞表面电荷研究及细胞筛选应用的新方法—电荷介导的磁性分离法“Charge-induced magnetic separation (CiMS)”；通过选取 Hela 细胞及 S180 细胞株与正电及负电荧光纳米磁珠共孵育并进行静电吸附介导的磁分离以及荧光显微观察，证实表面增强的负电荷性质是癌细胞一个重要特性；使用唾液酸苷酶和糖酵解抑制剂 3-溴丙酮酸预处理癌细胞，然后再进行磁分离实验，结果初步证实癌细胞变异的糖酵解能量代谢对其表面电荷有显著的影响。在实验基础上，我们试图从癌细胞变异的糖酵解能量代谢途径来思考并解释癌细胞表面强负电荷性质的原因。虽然该研究还有待更深入和细致地从多方面考查证实，我们提出：癌细胞广谱性的葡萄糖高摄取、乳酸高产出与其表面显著增强的负电荷之间有着直接的关系，糖酵解能量代谢的抑制可以显著地减弱癌细胞表面负电荷强度。该观点为癌细胞的代谢与其表面电荷性质的关系研究以及癌症诊断治疗的攻克提供了一个新思路。

**关键词：**微波合成；上转换发光；铁氧体；纳米材料；谷胱甘肽；聚多巴胺；细胞表面电荷；细胞分离。

## Abstract

In this thesis, rare earth doped upconversion luminescence nanoparticles (UCNPs) and spinel ferrite magnetic nanoparticles (MNPs) are chosen as research objects. The project mainly focuses on the preparation process, the relationship between structure & properties and the application in biomedical detection. The main contents are as follow.

In the first chapter, the mechanism of microwave heating and its advantage in the controlled synthesis of inorganic nanomaterials; the mechanism of upconversion luminescence; the unique magnetic properties of MNPs; and the application of these two materials in biomedical research are briefly reviewed.

In the second chapter, an efficient microwave-enhanced hydrothermal synthesis strategy for rapid synthesis of  $\beta$ -NaGdF<sub>4</sub>:Ln<sup>3+</sup> (Ln=Yb, Er/Tm/Ho) UCNPs with multicolor upconversion luminescence and paramagnetic properties has been developed. The uniform  $\beta$ -NaGdF<sub>4</sub>:Ln<sup>3+</sup> UCNPs could be rapidly formed within a few minutes at 160 °C. In comparison to conventional heating routes, a burst homogeneous nucleation and higher growth rate as well as enhanced dimensional homogeneity of the UCNPs was achieved in microwave heating. A microwave heating-based classical crystallization mode and surfactant assisted anisotropic growth mechanism were proposed for the formation of  $\beta$ -NaGdF<sub>4</sub>:Ln<sup>3+</sup> UCNPs.

In the third chapter, A series of ferrite nanocrystals MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (M=Fe, Mn, Co, Ni) were prepared via a microwave synthesis strategy. The whole synthesis process could be accomplished just in a few minutes at a moderate temperature. The products were systematically characterized and showed uniform spherical morphology with an average particle size of 6.0 nm, well crystallinity, superparamagnetic property and relatively high saturation magnetization. The Magnetic Resonance Imaging (MRI) T<sub>2</sub> relaxation performance of these MFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> MNPs were also investigated. MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> show much higher T<sub>2</sub> relaxation rate than that of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, thus has a promising potential application in MRI.

In the fourth chapter, dopamine-melanin can act as an ultra-efficient quencher for UCNPs and glutathione shows highly sensitive anti-quenching behavior by blocking the spontaneous oxidation of dopamine, thus, a biothiols detection platform with high specificity and sensitivity properties has been constructed. This approach features facile, fluorescence/visual detection, good specificity relative to biothiols and enhanced sensitivity by conducting in NIR excitation. This UCNPs-dopamine-melanin hybrid system show promising potential in studying biothiols levels in biological system.

In the fifth chapter, surface negative charged and positive charged nano magnetic beads were employed to investigate the surface charge properties of cancer cell. A new method for cell surface charge study and cells separation application, named “Charge induced magnetic separation (CiMS)” has been developed. By incubating the Hela cells and S180 cells with positive and negative charged nano magnetic beads respectively and followed a magnetic separation procedure, we found that the enhanced negative surface charge property is a unique character of cancer cells. Pretreatment of cancer cells with neuraminidase and glycolysis inhibitors, 3-bromine pyruvic acid, showed that the variation of glycolytic metabolism had obviously influence on the surface charge of cancer cells, while the removal of negatively charged sialic acid molecular does not have a detectable impact on the surface charge of cancer cell. Although more in-depth and meticulous research still needs to be done to confirm this discovery, we suggest that there is a strong correlation between the glycolytic pathway of energy metabolism and its enhanced surface negative charge property, the inhibition of glycolysis metabolism can significantly weaken the surface charges intensity of cancer cell. This discovery and point of view provide a new train of thought for cancer diagnosis and treatment.

**Keywords:** microwave synthesis, nanoparticles, upconversion luminescence, ferrite, glutathione, dopamine-melanin, surface charge of cancer cell, cell separation.

# 第一章 绪论

## 1.1 引言

纳米生物学主要研究纳米尺度上的生物和医学现象,其试图应用纳米技术来达到传统医学难以进行的检测、诊断和治疗目的。光学和磁性纳米材料是纳米生物医学研究和应用最广泛的功能材料之一。以 Au、Ag、Pt 等贵金属纳米晶, CdS、CdTe、ZnSe 等半导体量子点, NaY(Gd, Lu)F<sub>4</sub>:Yb,Er(Tm/Ho)等稀土掺杂上转换发光纳米晶为代表的纳米光学材料成为纳米光子学在生物医学中应用的主要研究对象。而纳米磁性材料,因其小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应等,使得其表现出不同于常规块体磁性材料的独特性质。近年来,光学和磁性纳米材料在生物医学检测、传感、成像标记、药物载体及治疗等方面的研究取得了重要的研究进展,已经有多个相关纳米材料与器件被批准进入市场,成为纳米技术在生物医学领域应用开发典型的成功案例之一。

通过开发先进的制备方法来得到不同尺寸和形貌、不同光学或特殊磁性能的功能纳米材料是纳米生物医学研究的最基本也是最关键的一步,经过表面修饰、功能复合,光学和磁性功能纳米材料在医学成像造影、生物分析检测、药物/基因载体及本身作为纳米药物等方面的应用成为了纳米生物医学的研究热点。然而,在这一系列的研究中仍然存在很多需要进一步探索的问题,如更简易、环保及大批量地制备无机纳米晶体,更便捷、“智能”及生物相容性的表面改性及功能复合过程,更精确地在单细胞、组织及器官水平介导成像、标记示踪应用等。

在本章中,我们将主要从微波加热的独特原理及其在纳米材料可控合成中的优势与应用,上转换发光的基本原理、磁性纳米材料的磁学特性,以及这两类材料在生物医学中的应用研究进展等方面进行综述,阐述与本研究相关的基本原理及前人在这些领域所做的贡献,并提出本论文的整体研究框架和主要创新点。

## 1.2 纳米生物学简述

纳米材料是构成纳米器件的基本结构单元,其通常指至少其中一维度尺寸在



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库